

基于主轴和进给轴电流的铣削力间接预测方法*

吴石, 董泽煜, 刘献礼, 孟悦

(哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室 哈尔滨, 150080)

摘要 提出了一种基于主轴和进给轴电流最优变权法的瞬时铣削力预测方法。首先,分析了主轴电流与 x 向瞬时铣削力的映射关系,基于互相关方法考虑了电流信号的延迟效应;其次,基于Devavit Hartenberg法对五轴机床进行运动学建模,将进给轴驱动力矩从机床坐标系映射到刀具坐标系,基于力雅可比矩阵得到进给轴驱动力矩和瞬时铣削力的映射关系;最后,基于最优变权法,综合考虑了主轴和进给轴电流对瞬时铣削力的影响,进行了瞬时铣削力预测实验。实验结果表明,基于主轴和进给轴电流最优变权法的瞬时铣削力预测误差在10%以内,能够有效预测加工过程的瞬时铣削力。

关键词 五轴机床;主轴电流;进给轴电流;最优变权法;瞬时铣削力
中图分类号 TH164

引言

瞬时铣削力直接影响加工过程中的铣削振动和铣削热的产生,精准预测瞬时铣削力对分析和改善加工工艺有重要意义^[1]。微元法是瞬时铣削力预测的传统建模方法,但其预测瞬时铣削力的精度较低且实时性差^[2-4]。

学者们开展了基于电流信号的瞬时铣削力预测方法研究^[5]。Altintas等^[6]针对叶轮和整体叶片等复杂零件的五轴加工,利用进给驱动电机电流信号来识别五轴铣削加工中的铣削力,证明了实现无传感器监控系统是可行的。Aslan等^[7-8]提出了直接利用数控机床主轴电流信号监测铣削加工过程中的颤振情况,并证明该方法可用于切削扭矩预测。Kim等^[9]分析了进给系统和主轴系统中交流感应电动机电流的灵敏度和带宽,选择主轴电流信号设计模糊逻辑控制器调节铣削力预测模型,将预测值与实测值进行比较。Bhattacharyya等^[10]提取了铣削复杂的电流特征信号,建立了多元线性回归铣削力预测模型。毛新勇等^[11]基于小波分析法确定了特征电流信号与铣削力信号的映射关系。李斌等^[12]分析了铣削力信号和电流信号的频域特性,得到不同频率下的映射参数,提出了分频法预测瞬时铣削力。王志永等^[13]建立了主轴运动学模型并标定了其待定参数,基于数值分析方法处理主轴电流信号,确定了主轴电流与铣削力的对应关系。黄颖旭等^[14]建立主轴电流信号预测铣

削力模型,得到主轴电流和刀具磨损的映射关系。电机电流信号^[15]会随着铣削力的变化而迅速波动,相比其他信号具有高实时性。基于主轴和进给轴的电流预测瞬时铣削力方法具有成本低、加工操作无干扰、无安装困难等优点,但采集电流的传感器存在延迟效应^[16]。

笔者首先分析了主轴电流与 x 向瞬时铣削力的映射关系,基于互相关方法考虑了电流信号的延迟效应;其次,基于Devavit Hartenberg法对五轴机床进行运动学建模,将机床坐标系中的进给轴驱动力矩映射到刀具坐标系中刀尖点的三向瞬时铣削力;最后,进行了基于主轴和进给轴电流的瞬时铣削力预测实验验证。

1 基于主轴电信号的瞬时铣削力建模

1.1 x 向瞬时铣削力建模

图1为VMC-C50五轴加工中心主轴驱动系统,其系统方程为

$$M_e = M_a + M_c + M_t = j \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_t \quad (1)$$

其中: M_e 为电机转矩; M_a 为惯性力矩; M_c 为铣削力矩; M_t 为摩擦力矩; j 为转动部件的总惯量; B 为等效阻尼系数; ω 为主轴电机角速度。

考虑铣削时主轴电机恒转速,主轴角加速度 $d\omega/dt=0$,故等效转动惯性力矩可忽略不计。主轴

* 国家自然科学基金资助项目(51720105009)

收稿日期:2022-02-20;修回日期:2022-05-22

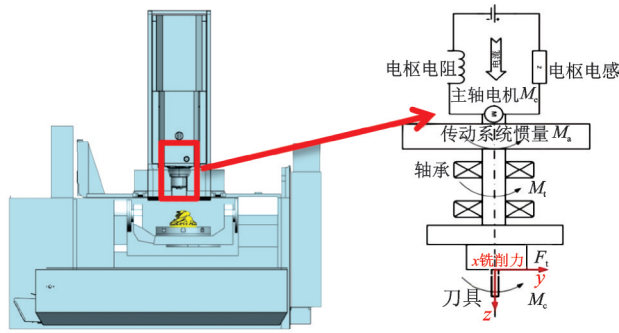


图1 VMC-C50五轴加工中心主轴驱动系统
Fig.1 VMC-C50 center spindle drive system

电流控制刀具周期性旋转只克服 x 向(切向)铣削力。建立 x 向瞬时铣削力与主轴电机电流的模型

$$M_e = j \frac{d\omega}{dt} + M_t + F_{tx}R = K_t I_{rms} \quad (2)$$

其中: F_{tx} 为 x 向瞬时铣削力; R 为铣刀半径; K_t 为电机转矩常量; I_{rms} 为电机三相电流有效值。

由式(1)可知,电机的输出转矩主要克服加工过程中的铣削力矩 M_c 、摩擦力矩 M_t 和惯性力矩 M_a 。由于式(2)中 j 和 M_t 未知,所以实测的 I_{rms} 不能直接求解 F_{tx} 。当主轴空转时,铣削力 F_{tx} 为0,此时电机的输出转矩用于克服 M_t 和 M_a ,用电机空载电流信号有效值 I_{rms_0} 来代表摩擦力矩 M_t 。

$$M_t = K_t I_{rms_0} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),则

$$F_{tx} = (I_{rms} - I_{rms_0}) K_t / R \quad (4)$$

1.2 瞬时铣削力的延迟效应补偿

当电机接收指令信号后,一般会受到扰动信号的影响,导致电流信号和铣削力信号存在相位延迟现象。假定在时域上电流信号 I_{rms} 延迟于 x 向瞬时铣削力信号 F_{tx} ,则

$$r_{IF}(\tau) = \int_0^t I_{rms}(t) F_{tx}(t - \tau) dt \quad (5)$$

其中: τ 为延迟量; t' 为有限时间间隔。

在实际处理中,信号离散化采集以方便计算机处理。 $F_{tx}(t)$ 和延迟时间为 τ 的 $I_{rms}(t + \tau)$ 在 N 个时间节点内的互相关函数为

$$r_{IF} = \sum_{n=0}^N I_{rms}(n) F_{tx}(n + \tau) \quad (6)$$

$(\tau = -N, -N + 1, \dots, N - 1, N; n + \tau \leq N)$

其中: r_{IF} 为 τ 的函数,当 r_{IF} 取最大值时, τ/ms 为 I_{rms} 对 F_{tx} 的一个时延。

基于互相关函数进行延迟补偿,不改变原始信号的幅值、频率和相位差。图2为互相关延迟补偿流程图。

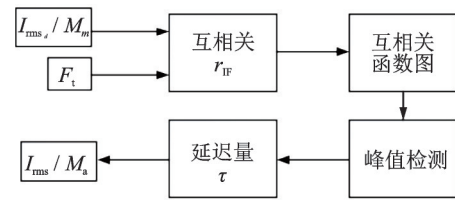


图2 互相关延迟补偿流程图

Fig.2 Flow chart of cross-correlation delay compensation

在VMC-C50五轴加工中心上进行铣削加工时,不同加工工况下的延迟量和相关系数如表1所示。

表1 不同加工工况下的延迟量和相关系数

Tab.1 Delay quantity and correlation coefficient under different working conditions

主轴 转速/(kr· min ⁻¹)	每齿 进给量 f _z /mm	径向 切深 a _c /mm	轴向 切深 a _p /mm	延迟量 τ/ms	相关 系数
3	0.05	0.4	3	-19	0.85
	0.10	0.4	4	-17	0.77
5	0.05	0.4	3	-18	0.74
	0.10	0.4	4	-16	0.78

在不同加工参数下,能耗仪测得的主轴电流信号和旋转测力仪测得的铣削力信号互相关函数如图3所示。可以看出,该机床主轴电流信号 I_{rms_s} 相对于 x 向瞬时铣削力信号 F_{tx} 都具有延迟特性,不同加工工况下延迟量的平均值为17.5 ms。当切削速度增大时,电流信号的延迟量有减小趋势,这是由于机床伺服系统变速而产生的,相关度为 0.8 ± 0.05 。

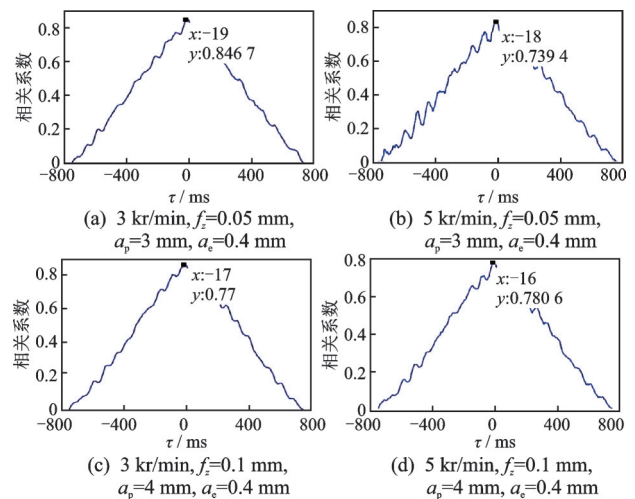


图3 不同加工参数的互相关函数图

Fig.3 Cross-correlation function diagram for different processing parameters

2 基于进给电流信号的瞬时铣削力建模

双转台五轴立式加工中心除了 x, y, z 3个直线轴之外,还包括2个回转轴,分别是环绕 x 轴回转的 A 轴和环绕 z 轴回转的 C 轴。机床主轴电流 I_{ms} 相对于 x 向瞬时铣削力 F_{tx} 具有时间上的延迟,机床坐标系中的进给电机转矩 $T_M=[T_{M-x} T_{M-y} T_{M-z} T_{M-A} T_{M-C}]$ 相对于 x, y, z 三向瞬时铣削力具有时间上的延迟,延迟补偿后的进给电机转矩信号为 $T_a=[T_{a-x} T_{a-y} T_{a-z} T_{a-A} T_{a-C}]$,进给电机转矩以进给轴驱动力的形式传递到工件坐标系。转矩信号表达式为

$$T_a = \frac{Pd_i}{\eta 2\pi} F_a = \frac{r_g}{\eta} F_a \quad (7)$$

其中: T_a 为机床坐标系上 x, y, z 方向进给电机驱动力 $F_{M-x}, F_{M-y}, F_{M-z}$ 和 A, C 轴旋转电机驱动力矩 T_{M-A}, T_{M-C} 的向量集,且 $T_a=[F_{a-x} F_{a-y} F_{a-z} T_{a-A} T_{a-C}]$; P 为丝杠螺距; $P/2\pi$ 为传动比; η 为效率; $d_i(i=x, y, z)$ 为刀尖位置距离工件坐标系原点的力臂长度; $r_g = Pd_i/2\pi$ 。

在某一时刻,工件坐标系中刀具所做的虚功和机床坐标系中驱动轴所做的虚功在静态平衡时相等。因此,基于雅可比矩阵将机床坐标系中的进给电机的驱动向量映射到工件坐标系中刀具的铣削向量上^[17],表达式为

$$J = \begin{bmatrix} \cos \theta_C \cos \theta_A \sin \theta_C \sin \theta_A \sin \theta_C & -Y \sin \theta_C \sin \theta_A (Z+a) \cos \theta_A \sin \theta_C & -X \sin \theta_C + Y \cos \theta_C \cos \theta_A + (Z+a) \sin \theta_A \cos \theta_C \\ -\sin \theta_C \cos \theta_A \cos \theta_C \sin \theta_A \cos \theta_C & -Y \cos \theta_C \sin \theta_A + (Z+a) \cos \theta_A \cos \theta_C & -X \cos \theta_C - Y \sin \theta_C \cos \theta_A - (Z+a) \sin \theta_A \sin \theta_C \\ 0 & -\sin \theta_A & \cos \theta_A & -Y \cos \theta_A - (Z+a) \sin \theta_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中: θ_A 为摆动轴转角; θ_C 为旋转轴转角; a 为 X_A 轴与机床坐标系原点的 z 向偏移; x, y, z 为刀刃刀口位置坐标。

$$D_{w-t} = \begin{bmatrix} \cos \theta_C & \cos \theta_A \sin \theta_C & \sin \theta_A \sin \theta_C & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_C & \cos \theta_A \cos \theta_C & \sin \theta_A \cos \theta_C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \theta_A & \cos \theta_A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

将进给驱动电机的驱动向量 T_a 转换为相应驱

$$\begin{bmatrix} F_{a-x} \\ F_{a-y} \\ F_{a-z} \\ T_{a-A} \\ T_{a-C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a-Z & Y & 0 & 0 & 0 \\ Y \cos \theta_A + (a-Z) \sin \theta_A & -X \cos \theta_A & X \sin \theta_A & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{tx} \\ F_{ty} \\ F_{tz} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$F_w^T \delta_t = T_a^T \delta_q \quad (8)$$

$$F_w = [F_{w-x} F_{w-y} F_{w-z} T_{w-i} T_{w-j} T_{w-k}] \quad (9)$$

其中: F_w 为工件坐标系上 x, y, z 方向的刀具瞬时铣削力 $F_{w-x}, F_{w-y}, F_{w-z}$ 和刀轴相应力矩 $T_{w-i}, T_{w-j}, T_{w-k}$ 的向量集; δ 表示无穷小的位移; δ_t 为微分旋转向量; δ_q 为微分平移向量。

雅可比矩阵不仅可以表示工件坐标系和机床坐标系的位置映射关系,还可以表示两坐标空间力、力矩的传递关系,矩阵中行和列都代表空间维数, m 行 n 列即为从 n 维空间向 m 维空间的映射。力雅可比矩阵 J^T 表示在平衡状态下工件坐标系中刀具上的瞬时铣削力与进给轴驱动向量的映射关系,根据雅可比矩阵的定义 $\delta_t = J \delta_q$,将其转换为

$$F_w^T J \delta_q = T_a^T \delta_q \rightarrow T_a = J^T F_w \quad (10)$$

基于Devavit Hartenberg法,确定了机床坐标系到工件坐标系、刀具坐标系到工件坐标系的2条运动链,将刀具坐标系上的瞬时铣削力映射到工件坐标系下的进给电机的驱动向量

$$F_w = D_{w-t} F_t \quad (11)$$

刀具坐标系中刀刃刀口上的瞬时铣削力与进给驱动电机转矩可通过下式转换

$$T_a = J^T D_{w-t} F_t \quad (12)$$

预测刀刃刀口上 x, y, z 方向的瞬时铣削力时,假设刀刃刀口上的铣削力矩忽略不计,对应项设置为0,倾斜旋转的雅可比矩阵为

基于Devavit Hartenberg法求解出从工件到刀刃刀口的旋转变换矩阵为

动方向的驱动力 F_a

映射到刀具坐标系中刀刃刃口的瞬时铣削力为

$$\begin{cases} F_{a-x} = F_{t-x} \\ F_{a-y} = F_{t-y} \\ F_{a-z} = F_{t-z} \\ T_{a-A} = F_{t-y}(a-z) + F_{t-z}y \\ T_{a-C} = F_{t-x}(y \cos \theta_A + (a-z) \sin \theta_A) - F_{t-y}x \cos \theta_A + F_{t-z}x \sin \theta_A \end{cases} \quad (16)$$

3 基于最优变权法的瞬时铣削力建模

图4为铣削力预测总体流程图。根据主轴电流建立了 x 向瞬时铣削力预测模型,根据进给轴的驱动力矩建立了进给电机转矩 x, y, z 方向瞬时铣削力预测模型。为了提高预测精度,根据最优变权法修正了 x 向瞬时铣削力预测模型。

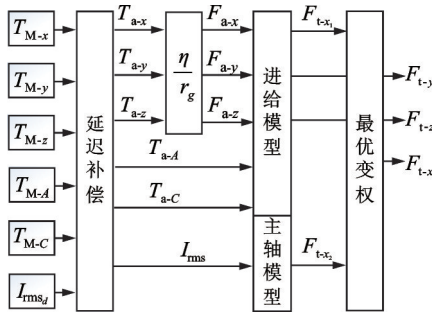


图4 铣削力预测总体流程图

Fig.4 Overall flow chart of the milling force prediction

最优变权法整合多个单一模型的信息,精准分配各个模型之间的权重,从而提高整体信息的预测精度。设基于最优变权法预测的 x 向瞬时铣削力为 F_{t-x} ,基于进给电流预测的 x 向瞬时铣削力为 F_{t-x_1} ,基于主轴电流预测的 x 向瞬时铣削力为 F_{t-x_2} ,则

$$F_{t-x}(n) = \omega_{t-x_{1n}} F_{t-x_1}(n) + \omega_{t-x_{2n}} F_{t-x_2}(n) \quad (17)$$

其中: $\omega_{t-x_{1n}}, \omega_{t-x_{2n}}$ 为权重系数,且满足 $\omega_{t-x_{1n}}, \omega_{t-x_{2n}} \geq 0, \omega_{t-x_{1n}} + \omega_{t-x_{2n}} = 1; n = 1, 2, \dots, N$ 。

最优变权法整合了主轴电流信息和进给电流信息,提高了电流预测瞬时铣削力的准确性。设 $F(n)$ 为 n 时刻测力仪的测试值,时间序列 $n = 1, 2, \dots, N$; $F_{t-x_1}(n)$ 和 $F_{t-x_2}(n)$ 为 n 时刻的预测值; $e_{t-x_{1n}} = F_{t-x_1}(n) - F(n)$ 和 $e_{t-x_{2n}} = F_{t-x_2}(n) - F(n)$ 为 n 时刻的误差。最优变权系数应满足

$$S = e_n^2 = e_{t-x_{1n}}^2 + e_{t-x_{2n}}^2 \quad (18)$$

设 $W_n = \begin{pmatrix} \omega_{t-x_{1n}} \\ \omega_{t-x_{2n}} \end{pmatrix}, A_n = \begin{pmatrix} e_{t-x_{1n}} & e_{t-x_{2n}} \end{pmatrix}$,由于

$$e_n = \omega_{t-x_{1n}} e_{t-x_{1n}} + \omega_{t-x_{2n}} e_{t-x_{2n}} = W_n^T \begin{pmatrix} e_{t-x_{1n}} \\ e_{t-x_{2n}} \end{pmatrix} \quad (19)$$

所以

$$e_n^2 = W_n^T A_n W_n \quad (20)$$

$$\min S = \sum_{n=1}^N \min W_n^T A_n W_n \quad (21)$$

设 $R = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$,则有

$$W_n = \frac{A_n^{-1} R}{R^T A_n R} = \begin{pmatrix} \omega_{t-x_{1n}} \\ \omega_{t-x_{2n}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_{t-x_{11}} & \omega_{t-x_{12}} & \dots & \omega_{t-x_{1N}} \\ \omega_{t-x_{21}} & \omega_{t-x_{22}} & \dots & \omega_{t-x_{2N}} \end{pmatrix} \quad (22)$$

最优变权法是在时域上对数据计算权重,对于周期性变化的数据,只在时间序列上发现重要信息,而不需要考虑系统内部的相互联系。

4 实验

为了验证本研究预测方法的准确性,建立了S型试件五轴铣削实验平台。该平台包括VMC-C50五轴加工中心、直径为8 mm的二刃硬质合金球头铣刀、铝合金材料的S型试件。能耗仪(FLUKE Norma 5000)采集主轴和进给轴的电流信号和转矩;旋转测力仪(Kisrlar5236B)测量 x, y, z 3个方向的瞬时铣削力。测力仪装置现场布置如图5所示。能耗仪测试系统现场布置如图6所示。

五轴铣削S型试件的铣削实验工艺参数选取如表2所示,3种参数分别作为3个影响因素,每种因素设置3个水平,利用旋转测力仪分别测得各工况

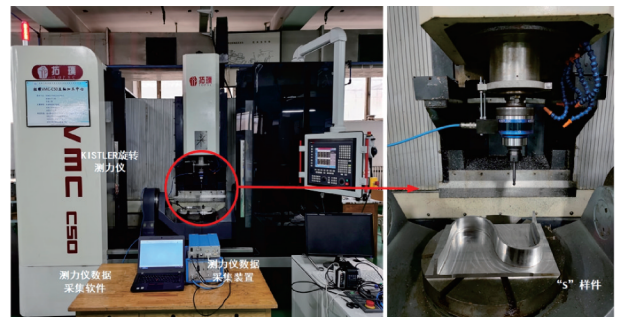


图5 测力仪装置现场布置

Fig.5 Field layout drawing of the force measuring instrument device



图6 能耗仪测试系统现场布置

Fig.6 Layout diagram of the energy consumption meter test system

表2 主要加工参数

Tab.2 Main processing parameter factors

	参数		
	每齿进给量 f_z/mm	径向切深 a_e/mm	轴向切深 a_p/mm
水平			
水平 1	0.05	0.1	3
水平 2	0.10	0.2	4
水平 3	0.15	0.3	5

下的铣削力数据。选取电流信号与铣削力信号的相关系数作为响应数据进行正交分析,得到三因素三水平正交实验结果如表3所示。

表3 正交实验结果

Tab.3 Orthogonal experiment results

实验编号	参数			相关系数
	每齿进给量 f_z/mm	径向切深 a_e/mm	轴向切深 a_p/mm	
1	0.05	0.1	3	0.85
2	0.05	0.2	4	0.81
3	0.05	0.3	5	0.83
4	0.10	0.1	4	0.77
5	0.10	0.2	5	0.79
6	0.10	0.3	3	0.80
7	0.15	0.1	5	0.78
8	0.15	0.2	3	0.82
9	0.15	0.3	4	0.75

依据极差分析法可知每齿进给量 f_z 显著,径向切深 a_e 和轴向切深 a_p 不显著,选择最优参数 $f_z = 0.05 \text{ mm}$, $a_e = 0.2 \text{ mm}$, $a_p = 3 \text{ mm}$,在加工过程中分别选用主轴转速 3 kr/min 和 5 kr/min 对 S 型样件进行铣削实验,能耗仪测得稳态铣削时进给电机电流如图 7 所示。

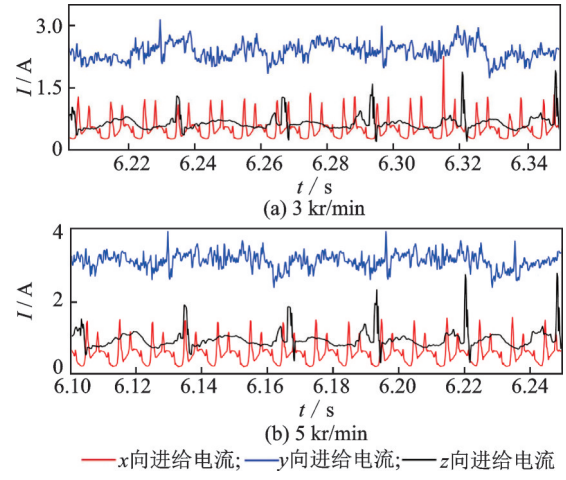


图7 进给电机电流

Fig.7 Feed motor current

x, y, z 3 个方向的铣削力预测值与实测值对比分别如图 8~10 所示。当主轴转速为 3 kr/min 时,

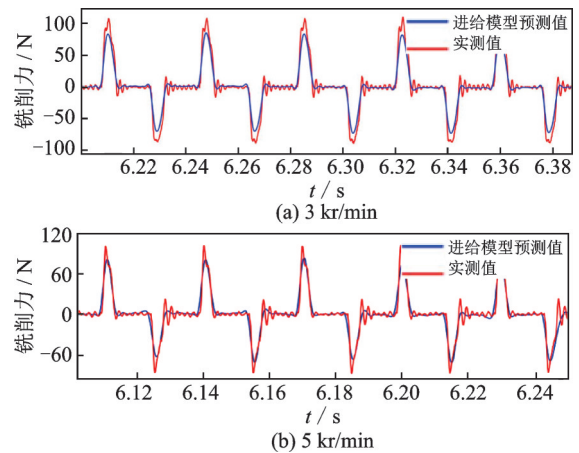


图8 x 方向铣削力预测值与实测值对比

Fig.8 Comparison diagram of the x direction milling force prediction value and the measured value

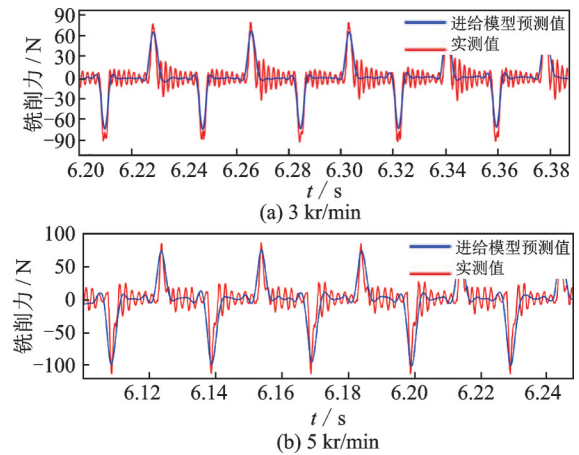


图9 y 方向铣削力预测值与实测值对比

Fig.9 Comparison diagram of the y direction milling force prediction value and the measured value

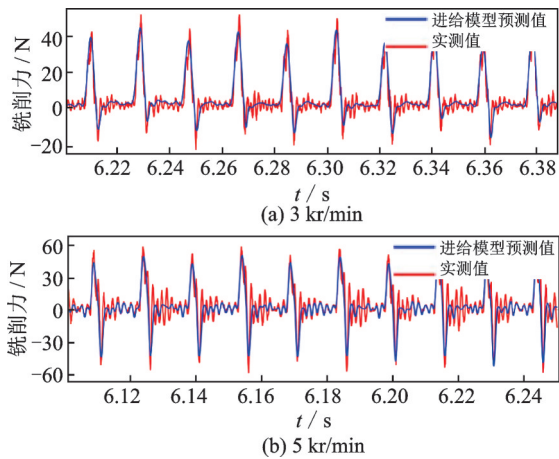


图10 z方向铣削力预测值与实测值对比图

Fig.10 Comparison diagram of the z direction milling force prediction value and the measured value

表4 三向铣削力实验值与进给电流预测值对比

Tab.4 The experimental value of the three-way milling force is compared with the predicted value of the feed current

主轴转速/ (kr · min ⁻¹)	F_x 预测值/ N	F_x 实测值/ N	F_x 误差/%	F_y 预测值/ N	F_y 实测值/ N	F_y 误差/%	F_z 预测值/ N	F_z 实测值/ N	F_z 误差/%
3	80.66	93.33	13.6	75.52	85.62	11.8	44.91	54.30	17.3
	83.89	104.96	20.1	80.25	92.77	13.5	38.67	46.03	16.0
5	91.81	107.32	14.5	79.99	91.63	12.7	53.34	63.88	16.5
	78.67	101.64	22.6	89.77	102.95	12.8	47.69	57.20	16.7

x向瞬时铣削力预测值与实测值的最大误差为22.6%,通过式(16)可以看出,x向瞬时铣削力的模型中包含更多的变量,较大的误差可归因于模型未能考虑刀具不完全对称的情况以及摩擦和惯性的误差,特别是对于A,C轴。y向误差在11.8%~13.5%,是加工时局部切削半径较小导致的。z向误差在17%左右,是因为z轴进给电机空转时电流也有变化。总体来说,建立的进给轴转矩预测瞬时铣削力模型,y,z向预测值与实测值的变化趋势相同、数值误差小;x向瞬时铣削力预测值平均误差较大。

能耗仪测得的主轴电机电流如图11所示。基于主轴电流x方向铣削力预测值和实测值对比如图12所示。

图11可以看出,主轴电流受负载影响明显,平衡负载响应迅速,和x向铣削力波形变化高度相似,这与互相关方法得到的强相关性吻合。从图12可以看出,主轴电流预测x向铣削力与实验值波形变化趋势相同。

通过实验数据进行仿真,对x向瞬时铣削力进行预测,基于式(20),(21)得到2种组合模型的权值。基于最优变权法的x向铣削力预测值与实测值

刀具转动一周的时间为0.02 s,每0.1 s铣削5个周期,0.24 s铣削12个周期。同理,当主轴转速为5 kr/min时,刀具转动一周的时间为0.012 s,每0.06 s铣削5个周期,0.18 s铣削15个周期。

从图8~10可以看出:x向进给电流与瞬时铣削力波形相似,延迟小于5 ms;y向进给电流幅值会随着主轴转速的提高而增加;当主轴转速为3 kr/min时,z向进给电流变化相对明显,这说明z向进给电流对切削负载较敏感,且受加工方式的影响,显示出间歇性波动状态。当瞬时铣削力为0时,电流值并不为0,是因为存在空载电流,以克服摩擦和惯性力矩。从进给电流信号中可分离出2方面信息:①克服切削负载;②克服机床传动系统的惯性摩擦力矩。三向铣削力实验值与进给电流预测值对比如表4所示。

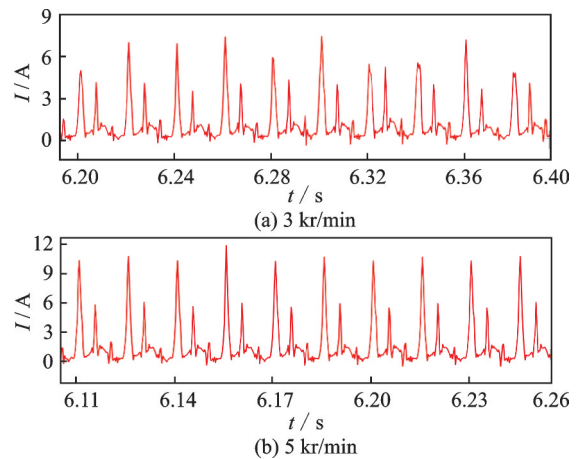


图11 主轴电机电流

Fig.11 Main shaft motor current

对比如图13所示。可以看出,基于最优变权法预测x向瞬时铣削力比单独预测模型x向铣削力与实测值曲线的重合度高。

表5为基于最优变权法的x向铣削力预测值与实测值对比。可见,进给模型预测x向瞬时峰值铣削力最大误差为22.6%,主轴模型预测x向瞬时峰值铣削力误差最大,为13.1%,相比于2种单独预测模型,基于最优变权法的瞬时铣削力预测模型精准

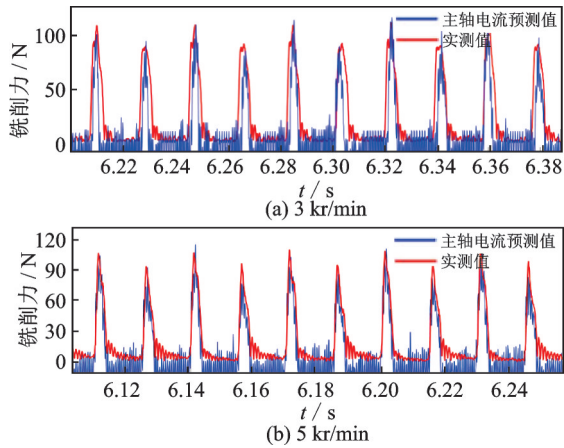


图12 基于主轴电流 x 方向铣削力预测值和实测值对比
Fig.12 Comparison of x and measured milling force based on spindle current

度最高,误差在7.7%~9.1%范围内。分析误差原因:①实际加工时刀具和工件接触区域受力产生变

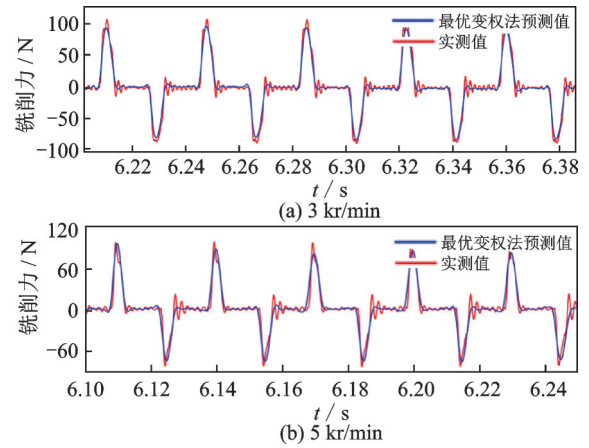


图13 基于最优变权法的 x 向铣削力预测值与实测值对比
Fig.13 Comparison of the predicted value of x direction milling force and measured value based on the optimal variable method

形;②预测模型未考虑刀具磨损等情况。

表5 基于最优变权法的 x 向铣削力预测值与实测值对比

Tab.5 Comparison of x direction milling force based on the optimal variable method

主轴转速/ (kr · min ⁻¹)	F_x 实测值/N	F_x 进给模型	进给模型	F_x 主轴模型	主轴模型	F_x 变权模型	变权模型
		预测值/N	预测误差/%	预测值/N	预测误差/%	预测值/N	预测误差/%
3	93.33	80.66	13.6	105.57	13.1	86.14	7.7
	104.96	83.89	20.1	117.99	12.4	96.25	8.3
5	107.32	91.81	14.5	119.42	11.3	98.84	7.9
	101.64	78.67	22.6	112.93	11.2	92.39	9.1

最优变权法预测瞬时铣削力综合考虑了主轴加工状态和进给轴转矩的变化,通过主轴电流模型中电流信号对负载变化响应迅速的特点,分析了周期性变化的瞬时铣削力信号,在时间序列上发现2种预测模型的 x 向瞬时铣削力预测值的权值,修正了进给电流预测瞬时铣削力模型不能客观考虑刀具磨损等因素影响预测精度的问题。

5 结论

1) 提出了一种基于主轴和进给轴电流最优变权法的瞬时铣削力预测方法。基于进给预测模型,预测 x 向瞬时铣削力的最大误差为22.6%, y 向误差在11.8%~13.5%, z 向误差在17%左右。基于最优变权法,计算主轴模型和进给模型的权重,该权重系数矩阵随时间改变,预测 x 向瞬时铣削力的误差控制在10%以内,较进给模型预测精度提高13.5%,比单一预测模型更加系统和全面。

2) 五轴机床在加工过程中主轴电机和进给伺服电机共同工作,实验时外接铣削力信号和电信号采集装置,电信号延迟于铣削力信号。基于互相关

系数法解决了信号的延迟问题,计算出在不同加工工况下信号的延迟量,平均值为17.5 ms,确定相关度为 0.8 ± 0.05 。

3) x 向进给电流与瞬时铣削力波形的趋势相似; y 向进给电流随着主轴转速提高而增长。值得注意的是, z 向进给电流在主轴转速低时变化明显,说明 z 向进给电流对切削负载较敏感;当铣削力为0时,电流并不为0,存在空载电流。

参 考 文 献

- [1] 吴石,张添源,刘献礼,等. 凸曲面拼接模具球头铣刀的瞬时铣削力预测[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(5): 948-956.
WU Shi, ZHANG Tianyuan, LIU Xianli, et al. Prediction of instantaneous milling force for ball-end milling cutter of convex surface splicing die [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(5): 948-956. (in Chinese)
- [2] WAN M, ZHANG W H. Calculations of chip thickness and cutting forces in flexible end milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing

- Technology, 2006, 29(7/8): 637-647.
- [3] 王立平,王顶,于广,等. 五轴侧铣加工铣削力预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(9): 972-978.
WANG Liping, WANG Ding, YU Guang, et al. Milling forces during five-axis flank milling [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(9): 972-978. (in Chinese)
- [4] SALEHI M, ALBERTELLI P, GOLETTI M, et al. Indirect model based estimation of cutting force and tool tip vibrational behavior in milling machines by sensor fusion[J]. Procedia CIRP, 2015, 33: 239-244.
- [5] CHO D W, JEONG Y H. Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(14): 1559-1566.
- [6] ALTINTAS Y, ASLAN D. Integration of virtual and on-line machining process control and monitoring [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 349-352.
- [7] ASLAN D, ALTINTAS Y. On-line chatter detection in milling using drive motor current commands extracted from CNC [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 132: 64-80.
- [8] ASLAN D, ALTINTAS Y. Prediction of cutting forces in five-axis milling using feed drive current measurements [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(2): 833-844.
- [9] KIM D, JEON D. Fuzzy-logic control of cutting forces in CNC milling processes using motor currents as indirect force sensors[J]. Precision Engineering, 2011, 35(1): 143-152.
- [10] BHATTACHARYYA P, SENGUPTA D, MUKHPADHYAY S, et al. On-line tool condition monitoring in face milling using current and power signals [J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(4): 1187-1201.
- [11] 毛新勇,刘红奇,李斌. 主轴电流信号中铣削力成分的时频分析及提取方法研究[J]. 中国科学(E辑:技术科学), 2009, 39(11): 1824-1827.
MAO Xinyong, LIU Hongqi, LI Bin. Research on time-frequency analysis and extraction method of milling force component in spindle current signal [J]. Scientia Sinica (E: Technological), 2009, 39(11): 1824-1827. (in Chinese)
- [12] 李斌,刘晓龙,刘红奇,等. 基于驱动电流的动态铣削力估计方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 1-6.
LI Bin, LIU Xiaolong, LIU Hongqi, et al. Estimation of dynamic milling force by feeding motor currents [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2013, 41(6): 1-6. (in Chinese)
- [13] 王志永,杜伟涛. 基于主轴系统电机电流信号监测铣削力的研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(1): 259-264.
WANG Zhiyong, DU Weitao. Monitoring of the milling force based on the current signals of spindle drive motors [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(1): 259-264. (in Chinese)
- [14] 黄颖旭,李波,田锡天. 基于主轴电流的铣削力间接监测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(1): 93-101.
HUANG Yingxu, LI Bo, TIAN Xitian. Indirect monitoring method of milling force based on spindle current [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(1): 93-101. (in Chinese)
- [15] ABELE E, ALTINTAS Y, BRECHER C. Machine tool spindle units [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 781-802.
- [16] 李斌,张琛,刘红奇. 基于主轴电流的铣削力间接测量方法研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008(3): 5-7.
LI Bin, ZHANG Chen, LIU Hongqi. Indirect measurement of the milling forces based on spindle motor current [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2008(3): 5-7. (in Chinese)
- [17] 彭芳瑜,马吉阳,王力,等. 任意结构多轴数控机床后置处理的全微分求解算法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 121-126.
PENG Fangyu, MA Jiyang, WANG Li, et al. Post-processing algorithm based on total differential method for multi-axis machine tools with arbitrary configuration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 121-126. (in Chinese)



第一作者简介: 吴石,男,1971年8月生,博士、教授。主要研究方向为机械动力学和在机测量等。曾发表《凸曲面拼接模具球头铣刀的瞬时铣削力预测》(《振动、测试与诊断》2020年第40卷第5期)等论文。

E-mail: wushi971819@163.com